

Controle de uma coluna de destilação fracionada projetada com solidworks®, utilizando a biblioteca simmechanics**Control of a fractional distillation column designed with solidworks®, using the simmechanics library**

Recebimento dos originais: 10/07/2018

Aceitação para publicação: 28/08/2018

José Leonardo Benavides Maldonado

Master em Control Automático y Sistemas Informáticos por la Universidad Central de las Villas (UCLV)-Cuba

Universidad Nacional de Loja (UNL), Cda Universitaria

Dirección: Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, Loja-Ecuador

E-mail: jose.benavides@unl.edu.ec

Diego Eduardo Jara Delgado

Master em Docencia Universitaria e Investigación Educativa en la Universidad Nacional de Loja (UNL)

Universidad Nacional de Loja (UNL), Cda Universitaria

Dirección: Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, Loja-Ecuador

E-mail: diego.jara@unl.edu.ec

Gonzalo Ramiro Riofrio Cruz

Master em Ciencias por la Universidad Amistad de los Pueblos-Moscú

Universidad Nacional de Loja (UNL), Cda Universitaria

Dirección: Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, Loja-Ecuador

E-mail: gonzalo.riofrio@unl.edu.ec

Hernan Luis Castillo García

Master en ingeniería ambiental y seguridad industrial-Perú.

Universidad Nacional de Loja (UNL), Cda Universitaria

Dirección: Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, Loja-Ecuador

E-mail: hernancastil@yahoo.es

Luisa Ines Sinche Freire

Master en Educación de la Universidad Nacional de Loja (UNL)

Universidad Nacional de Loja (UNL), Cda Universitaria

Dirección: Av. Pío Jaramillo Alvarado y Reinaldo Espinosa, La Argelia, Loja-Ecuador

E-mail: luisa.sinche@unl.edu.ec

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o comportamento de uma coluna de destilação fracionada, a partir do uso de controle fuzzy baseado nas regras de Mandani, sem a necessidade de calcularum modelo matemático. O projeto da coluna de destilação é baseado em um modelo existente no

Departamento de Engenharia Química da Universidade de Leuven, Bélgica, o qual é realizado com o uso do software SolidWorks®, e através da biblioteca SimMechanics, presente no MATLAB®/Simulink, obtém-se um diagrama de blocos que representa o comportamento da coluna de destilação, sem o uso de técnicas de identificação ou baseado no uso de modelagem caixa branca. Dessa forma, o foco do projeto se estabelece no desenvolvimento das partes físicas de determinados processos, sem a preocupação da obtenção de um modelo matemático que possa representar o processo.

Palavras-chave: Colunas de destilação. Controle fuzzy. Indústria química. Simulink. SolidWorks.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the behaviour of a fractional distillation column, from the use of fuzzy control based on the Mandani rules, without the need of calculating a mathematical model. The design of the distillation column based on an existing model in the Department of Chemical Engineering at the University of Leuven, Belgium, which is conducted using SolidWorks®, through software and SimMechanics library present in MATLAB®/ Simulink, obtain a block diagram representing the behaviour of the distillation column, without the use of identification techniques or based on the use of white box modelling. Thus, the focus of the project is established in the development of the physical parts of certain processes, without the worry of getting a mathematical model that can represent the process.

Keywords: Chemical industry. Distillation columns. Fuzzy Control. Simulink. SolidWorks.

1 INTRODUÇÃO

As colunas de destilação são consideradas uma das mais importantes operações unitárias em processos químicos, e também uma das operações unitárias mais estudadas em termos de controle (LUYBEN, 1992, 1998, 2013; SKOGESTAD, 1997, 2007; BEQUETTE, 1998).

Devido à complexidade apresentada das colunas de destilação em plantas industriais, a demanda de um determinado produto com qualidade e com baixo custo deve ser satisfeita com a aplicação de técnicas modernas de sistemas de controle. Isso implica em algumas vantagens como (BORROTO, 2015):

- O aumento da eficiência, da confiabilidade de uma unidade de destilação e da qualidade do produto;
- A otimização do processo em sua máxima capacidade;
- A promoção da pesquisa dessa área no país para obter uma tecnologia de vanguarda.

Além disso, o projeto de uma coluna de destilação e o controle das diversas variáveis dessa operação unitária é de grande importância para que se obtenha a produção de um determinado produto dentro das especificações por normas para a venda, ou para sua utilização em outros processos químicos (BEQUETTE, 1998).

A separação de misturas, que faz parte de uma planta de processamento de petróleo através das colunas de destilação, é realizada através da coexistência de duas zonas de operação, de diferentes temperaturas, pressões, composições e fases de estado. Cada molécula da mistura a separar, reage de uma única forma aos diferentes ambientes, oferecidos pelas zonas de operação. Como consequência, o sistema se move ao equilíbrio, e cada componente da mistura se estabelece em diferentes concentrações, em cada zona de operação. Esse resultado permite realizar a separação das diferentes misturas, podendo ser dividida em separação bifásica (gás-líquido) e em separação trifásica (água, óleo e gás) (KISTER, 1990, 1992).

Na maioria das indústrias, as colunas de destilação apresentam esquemas de controle linear do tipo cascata (ROVAGLIO *et al*, 1990), os quais devem ser propostos pela dinâmica não linear apresentada por esse tipo de sistemas (IBÁÑEZ, 2010).

Diversos tipos de controladores vêm sendo propostos para colunas de destilação, controlando as diversas variáveis de interesse. Em específico, o controle *fuzzy* para colunas de destilação tem recebido algumas contribuições, com os mais diferentes algoritmos (STENZ; KUHN, 1995; WORAPRADYA; PRATISHTHANANDA, 2005; CHEINGJONG; PRATISHTHANANDA, 2008; BORROTO, 2015).

O objetivo deste artigo é apresentar o projeto de um controle *fuzzy* aplicado a uma coluna de destilação projetada em SolidWorks®, sem a necessidade de se estabelecer um modelo matemático através de equacionamentos pela dinâmica do processo, ou através de técnicas de identificação de sistemas. O comportamento da coluna de destilação é obtida pela conversão do desenho CAD (em SolidWorks®) através do uso do toolbox SimMechanics do Matlab/Simulink®, projetando desse modo, o controle *fuzzy* com o uso das regras de Mandani.

Este artigo é organizado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados, o princípio básico de funcionamento de uma coluna de destilação fracionada e um exemplo de um projeto por meio do *software* Aspen Plus; na Seção 3 é apresentado o projeto da coluna de destilação fracionada, desenvolvido em SolidWorks®, a transformação desse projeto em um diagrama de blocos no Matlab/Simulink® e os princípios básicos do controle *fuzzy* baseado nas regras de Mandani; na Seção 4 são apresentados os resultados obtidos através da simulação do projeto da coluna de destilação, implementando o controle *fuzzy*, e por fim, na Seção 5 são apresentadas as considerações finais do trabalho.

2 COLUNAS DE DESTILAÇÃO

Para o processamento do petróleo extraído dos diferentes tipos de depósitos, existem diversas operações unitárias para o seu beneficiamento nos mais diversos produtos. Na operação

unitária de separação de misturas, o petróleo é inserido em um ou mais pontos de uma coluna de destilação, equipamento utilizado na operação unitária de separação.

Na coluna de destilação, aproveitando a diferença de gravidade entre o vapor e o líquido (separação bifásica), pode-se observar que o vapor sobe pela coluna, se encontrando em cada prato da torre com o líquido, que tende a descer por ela. A alimentação em uma coluna de destilação é conhecida como mistura ou carga, e os componentes separados são conhecidos como cortes ou frações.

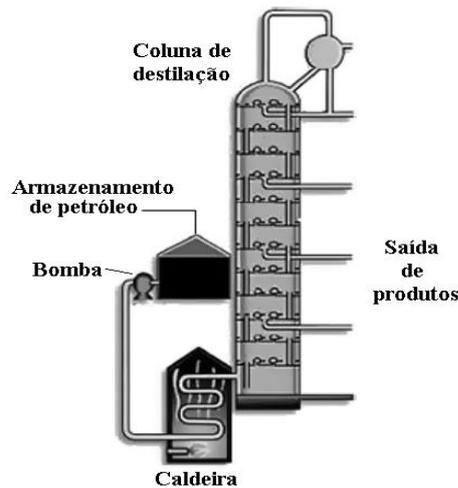
Na coluna de destilação, existem aquecedores que podem vaporizar, de forma parcial ou completa, o fluxo que recebem do fundo da coluna. O vapor que vai para a parte superior da coluna de destilação, onde se encontra o condensador, se esfria e se condensa em estado líquido. O restante do líquido é eliminado da coluna como sedimento, já que cumpre as condições de composição desejada.

Esse líquido retorna à coluna de destilação, utilizando uma válvula de descarga que permite manter o controle de um dos componentes da mistura. Além de possuir pressão, produz um excesso em cada placa da coluna. O restante da mistura, que possui a composição desejada, é retirado como o produto final no topo da coluna de destilação (SEADER; SIROLA; BARNICKI, 1999).

A Figura 1 ilustra o processo básico de refino de petróleo, através do uso da destilação fracionada, que é um processo físico utilizado para separar a mistura de líquidos mediante o uso de calor, sendo um grande permutador de calor e de massa entre os vapores gerados e os líquidos. Esse processo é utilizado, principalmente, quando há a necessidade de separar os compostos de substâncias com diferentes pontos de ebulição, porém mais próximos.

Na destilação fracionada é utilizada a coluna de destilação, que permite um maior contato entre os vapores que ascendem com o líquido condensado que descende, através do uso de diferentes pratos, ou placas. Isso facilita a troca de calor entre os vapores (que cedem calor) e os líquidos (que recebem calor), onde essa troca produz um intercâmbio de massa, em que os líquidos com menor ponto de ebulição se convertem em vapor, e os vapores de substâncias com maior ponto de ebulição passam ao estado líquido (LUYBEN, 1996).

Figura 1 – Processo básico de refino de petróleo por destilação fracionada.



Fonte: Adaptado de: <http://migre.me/tXUej>.

2.1 PROJETO DE COLUNAS DE DESTILAÇÃO ATRAVÉS DO ASPEN PLUS

Para o projeto de colunas de destilação, pode ser utilizado o modelo *RadFrac*[®], disponível no *software* Aspen Plus[®], que se baseia nas equações MESH (M: balanços de massa; E: equações de equilíbrio líquido-vapor; S: somatório das frações molares igual a 1; H: balanços de entalpia) o que nesse método, um conjunto de quatro equações é executado de forma simultânea, em que o método é mais completo do que os métodos curtos, baseado no balanço de massas (RICO-RAMIREZ; DIWEKAR, 2000).

A informação gerada é necessária ao projeto preliminar da coluna de destilação para que se possa realizar um projeto mais rigoroso, podendo ser utilizado para sistemas ideais altamente não ideais, em que no primeiro, o *software* possui uma convergência padrão, e no segundo pode escolher uma convergência não linear. O *software* também fornece suporte para o dimensionamento da coluna e o seu diâmetro a ser estimado.

Na Figura 2 é ilustrado um exemplo de um projeto de coluna de destilação para a separação bifásica, utilizando o *RadFrac*[®] para o cálculo de parâmetros do projeto. Nesse exemplo, é utilizada uma separação de hidrocarbonetos que se alimentam a 100 psia, que significa a pressão relativa adicionada de 14,7 psi. Essa mistura contém alcanos (hidrocarbonetos formados por carbono e hidrogênio, que possuem ligações simples carbono-carbono), desde o butano até o heptano. Um rápido estudo em relação à produção de butano e de pentano foi determinado para que a pressão de operação fosse de 70 psia em um condensador total (produto totalmente líquido), com uma queda de pressão de 0,1 psi em toda a coluna de destilação.

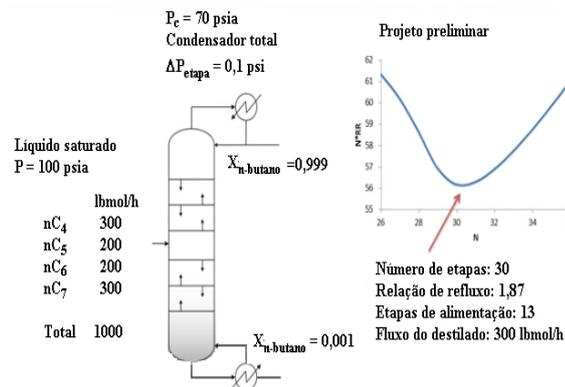
Observa-se ainda na Figura 2 que a coluna de destilação deve ser capaz de produzir butano em seu topo com 0,999 de fração molar. A curva da direita na Figura 2 ilustra o número de etapas,

observando o ponto de mínimo da curva, é de 30, com uma relação de refluxo de 1,87, alimentando-se na etapa 13 (MACÍAS, 2014).

3 PROJETO DA COLUNA DE DESTILAÇÃO E O CONTROLE FUZZY APLICADO

Nesta seção são descritos, o projeto da coluna de destilação fracionada realizado em SolidWorks® e o projeto do sistema de controle, realizado em Matlab®/Simulink®.

Figura 2 – Exemplo de um projeto de coluna de destilação bifásica usando o modelo *RadFrac*® no cálculo de parâmetros.



Fonte: Macías, 2014.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROJETO DA COLUNA DE DESTILAÇÃO FRACIONADA EM SOLIDWORKS®

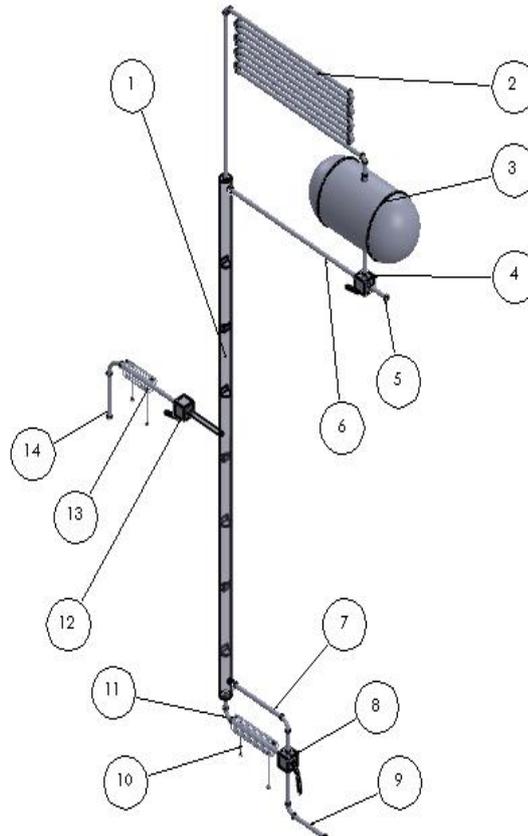
Através do projeto utilizando CAD (*Computer Aided Design*) com o uso do software SolidWorks®, a coluna de destilação é modelada, ilustrada na Figura 3. Cada parte da coluna de destilação modelada e numerada é descrita da seguinte forma.

A parte principal do projeto é a coluna de destilação (1) de 14 cm de diâmetro e com seis metros de altura, projetada com sete pratos. A parte superior da coluna é conectada ao condensador (2), e o líquido residual dessa parte do processo fica no tanque de armazenamento (3). Se estiver dentro da faixa permitida, a válvula de três vias (4) permite a passagem do líquido para o tubo (5), e caso não atenda aos parâmetros estabelecidos, retorna à coluna de destilação através do tubo (6).

O sedimento, produto da destilação, é obtido na parte inferior da coluna (1), que flui através do tubo (11). Esse sedimento passa por um processo de aquecimento através da serpentina (10) até chegar à válvula de três vias (8), que faz parte de outra malha de controle. Se o produto estiver dentro dos parâmetros estabelecidos, a válvula permite que esse vá ao tubo (9), caso contrário, retorna ao tanque através do tubo (7). O ingresso da matéria prima ou perturbações é realizado

através do tubo (14), quando a válvula de dois estados (12) está aberta. Antes de ingressar na coluna de destilação, a matéria prima sofre um pré-aquecimento através da serpentina (13) (HUICK *et al*, 2011).

Figura 3 – Coluna de destilação modelada em Solid Works®



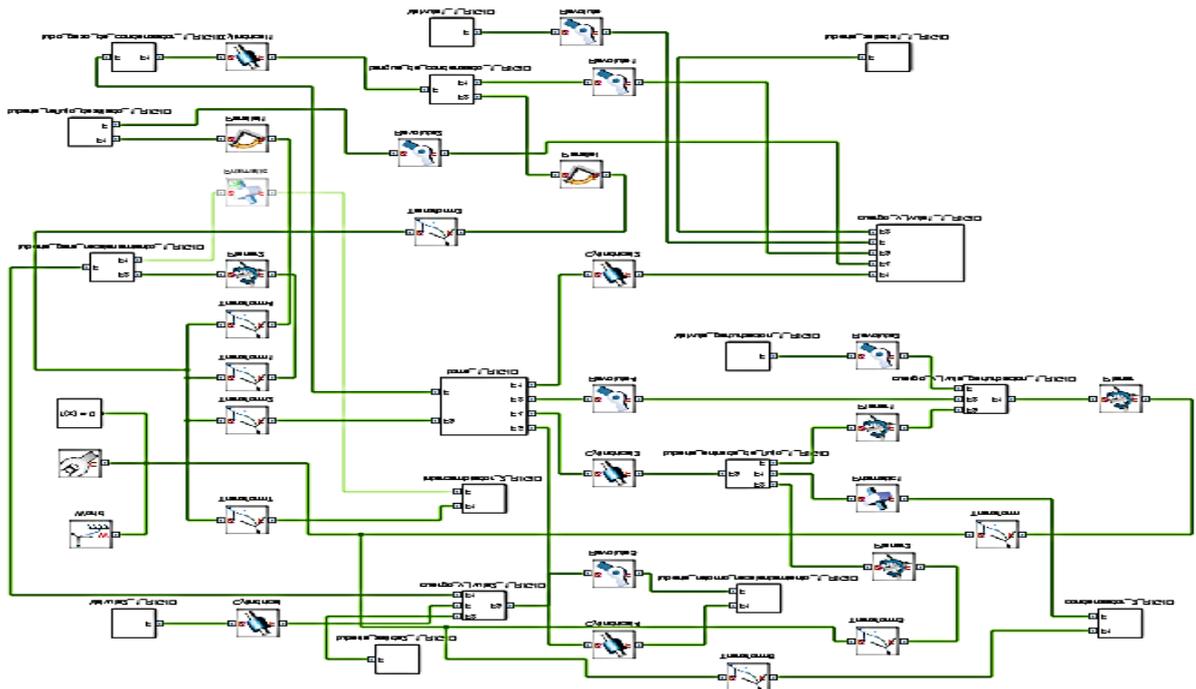
Segundo Cekus, Posiadala e Warys (2014), a montagem de elementos separados em um software de CAD pode ser utilizada para estudos de simulação na área de sistemas de controle, porque nesses casos, existe uma interação entre as partes individuais.

Essa premissa é assumida no projeto da coluna de destilação (Figura 3), composto por 14 partes individuais diferenciadas entre torre, depósitos, permutadores de calor, válvulas e condutos tubulares, cada uma com função específica.

O projeto de um sistema de controle para colunas de destilação é um problema que possui um desafio maior, já que é um processo multivariável, altamente interativo e inerentemente, não linear. Além disso, existem diversas restrições sujeitas a grandes perturbações frequentes.

Esses fenômenos de não linearidades devem-se, principalmente, a determinadas mudanças em uma ou mais variáveis manipuladas, que não dependem apenas da magnitude da mudança, como também do ponto de operação em que o processo será ativo. Uma das razões fundamentais de

Figura 5 – Diagrama de blocos gerado pelo SimMechanics para o Simulink, para o projeto da coluna de destilação fracionada desenvolvida em SolidWorks®.



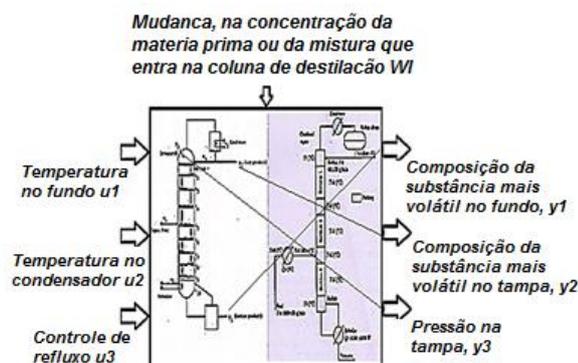
As variáveis de entrada e de saída escolhidos para o projeto do sistema de controle estão ilustradas no Quadro 1, em que as entradas são: a temperatura no fundo da coluna de destilação (T_f); a temperatura no condensador (T_T); e o controle de refluxo (R_e). As variáveis de saída do processo são: composição da substância mais volátil no fundo da coluna (C_f); composição da substância mais volátil na tampa localizada na parte superior da coluna (C_t); e pressão na tampa (P_t).

Quadro 1 – Variáveis do processo da coluna de destilação para o projeto do sistema de controle.

MODELO DA PLANTA	
Variáveis de entrada	Variáveis de saída
Temperatura no fundo (T_f), dado em °C.	Composição da substância mais volátil no fundo (C_f), dado em g/ml x100%. A fração molar é adimensional.
Temperatura no condensador (T_r), dado em °C.	Composição da substância mais volátil na tampa (C_t), dado em g/ml x100%. A fração molar é adimensional.
Controle de refluxo (R_e), dado em g/min.	Pressão na tampa (P_t), dado em Pascal (Pa).
Perturbações	
Mudança na concentração da matéria prima ou da mistura que entra na coluna de destilação (W_1), dado em g/min.	

Na Figura 6 são ilustradas as variáveis do processo da coluna de destilação, em um modelo caixa preta, em que se percebe que o sistema é multivariável com as três entradas e as três saídas, além da perturbação ao processo.

Figura 6 – Modelo caixa preta da coluna de destilação fracionária para uma separação binária.



Fonte: Adaptado de Huick *et al.*, 2011.

3.3 CONTROLADOR BASEADO EM LÓGICA FUZZY

O projeto escolhido para o sistema de controle é baseado na lógica *fuzzy*, devido a sua capacidade para modelar o conhecimento humano (MENDEL, 1995).

O raciocínio humano utiliza predicados multivalentes, como, por exemplo, predicados vagos, ambíguos e imprecisos. Dessa forma, surge a necessidade de introduzir uma lógica que possa recolher esse tipo de raciocínio. A lógica *fuzzy* cobre esse tipo de predicados imprecisos em seu raciocínio, como o fazem as pessoas (MORALES-LUNA, 2002).

As regras *fuzzy* são: *if-then*, também são conhecidas como instruções condicionais *fuzzy*, em que essas são expressões em que A e B são os conjuntos difusos (ZADEH, 1973). Esses conjuntos difusos se caracterizam ao antecedente e executam certa operabilidade entre elas, ou seja, a regra pode ser expressa como na Equação (1).

$$\text{if } x \in A \wedge y \in b \text{ then } z = f(x, y) \quad 1)$$

em que: $z = f(x, y)$ é uma função *singleton* que caracteriza o conseqüente, ou seja, aquela função que retorna um valor concreto, como por exemplo, o ponto específico do conjunto (VILLETA *et al*, 2012).

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

A implementação do modelo, baseando-se no tipo de lógica *fuzzy* definida na Equação (1), tem sido elaborada utilizando o MATLAB®, para as simulações e o motor de inferência *fuzzy* implementado para essa finalidade (VILLETA *et al*, 2012).

Nesse modelo, devem ser definidas as variáveis de entrada e de saída, de maneira que se possam limitar os valores, tal que, o controlador *fuzzy* projetado possa realizar as mudanças no processo. Na Figura 7 é ilustrado o diagrama de inferência através das regras *fuzzy* de Mandani, de uma das três variáveis a ser controladas no processo da coluna de destilação.

É importante destacar que se há a utilização das regras *fuzzy* de Mandani para o projeto do controlador da coluna de destilação fracionada, a composição no alto é um valor próximo a um, e no fundo da coluna com um valor próximo a zero.

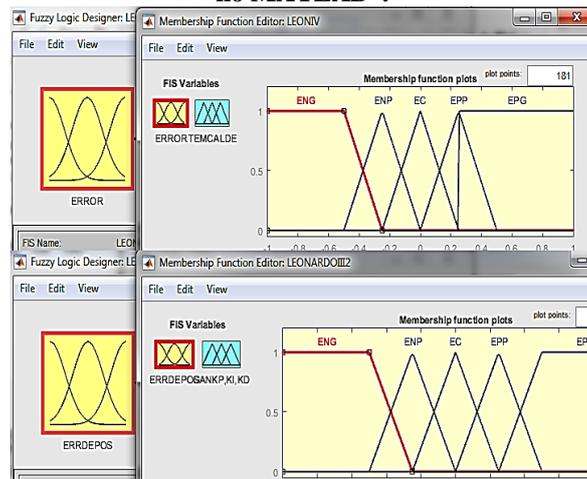
Através do Matlab® e sua biblioteca *fuzzy*, são escolhidas as funções de pertinência e as regras *fuzzy*, sendo essas últimas ilustradas no Quadro 2.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Com o controlador *fuzzy* estabelecido para a coluna de destilação modelada no SimMechanics, os resultados são apresentados nesta seção.

Na Tabela 1 são ilustrados os resultados obtidos ao aplicar um controlador *fuzzy* à coluna de destilação projetada e as respostas obtidas através da simulação do processo no Simulink são ilustradas nas Figuras 8 a 10.

Figura 7 – Sistema completo com o diagrama de inferência através das regras *fuzzy* de Mandani, implementado no MATLAB®.



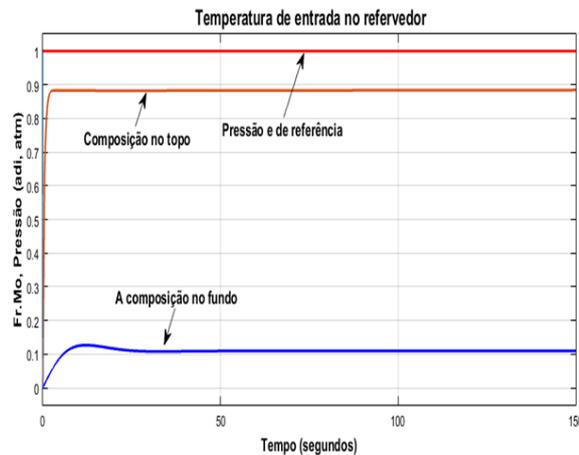
Quadro 2 – Regras *fuzzy* as variáveis de entrada e saída do processo.

Variável	Nível de linguagem em	Refluxo (0-2,5)	Temp. no topo (0-2,5)	Temp. no fundo (0-0,30)	Entrada do produto (0-1)
Comdes(0-0,08)	BAIXO	ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO
	ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO	ALTO
Comsed(0-0,02)	ALTO	BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO
	BAIXO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
Pre (0-1)	ALTO	ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO
	BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO	ALTO

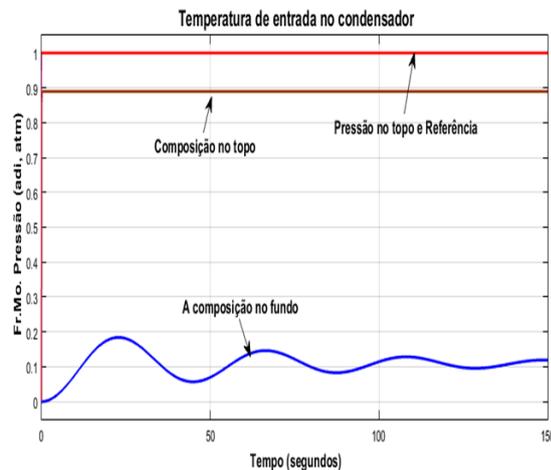
Tabela 1 – Valores obtidos ao aplicar um controlador *fuzzy* ao processo.

Variáveis de saída	Valor calculado	Valor esperado
Composição do sedimento(Adimensional)	0,08	O mais próximo de zero
Composição do destilado (Adimensional)	0,92	O mais próximo de um
Pressão no topo da coluna (atm)	1	Entre 0 e 1

Simulando o sistema para o primeiro grupo de variáveis que são a temperatura no refeedor, como entrada, e como saídas, a composição da mistura e a pressão no topo da coluna de destilação, além da composição da mistura na parte inferior da coluna, se obtém a Figura 9, em que a pressão atinge o valor desejado de 1 atm, a composição no topo fica próximo a 1 e a composição do fundo da coluna de destilação, próximo a zero.

Figura 9 – Simulação com controle *fuzzy* para o primeiro grupo de variáveis.

O segundo grupo de variáveis testadas na simulação possui como entrada a temperatura no condensador e como saídas, as composições no e no fundo da coluna de destilação e a pressão no topo da coluna, em que se obtêm a Figura 10. Nessa figura pode ser observada que a pressão no topo é igual ao valor de referência de 1 atm, tanto para esse caso como para o primeiro (Figura 9), sendo a composição no topo da coluna próximo a um, com uma pequena variação em relação ao caso anterior. Finalmente, a composição no fundo da coluna fica próximo ao valor de 0, porém com um tempo de estabilização maior do que o primeiro caso.

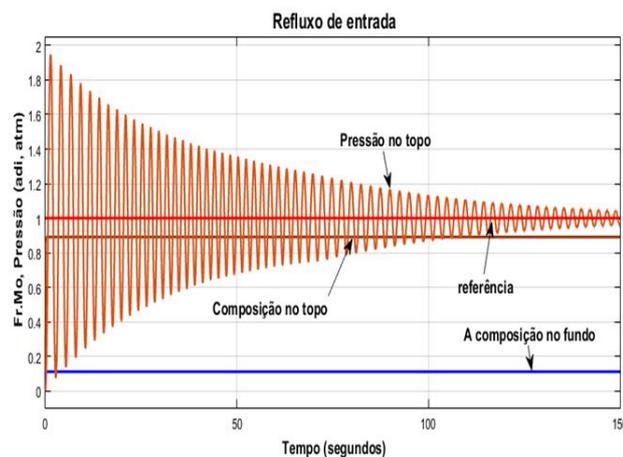
Figura 10 – Simulação com controle *fuzzy* para o segundo grupo de variáveis.

O terceiro grupo de variáveis possui como entrada o refluxo, medido em fração molar e as saídas, que são a composição no topo e no fundo da coluna de destilação e a pressão no topo da coluna. Os resultados para o controle *fuzzy* são ilustrados na Figura 11, que se observa que a pressão no topo se estabelece no valor de referência de 1 atm para o primeiro e segundo grupo de

variáveis, porém na simulação com as variáveis do terceiro grupo, o sistema dinâmico possui um comportamento subamortecido.

Para a composição no topo da coluna de destilação, observa-se que o valor se aproxima ao valor de referência (um), que é o melhor resultado obtido em relação ao primeiro e terceiro grupo de variáveis. Para a composição no fundo da coluna, observa-se que o valor em torno de 0,1 se estabelece mais rápido que os dois grupos anteriores, sem o aparecimento de *overshoot* na variável.

Figura 11 – Simulação com controle *fuzzy* para o terceiro grupo de variáveis.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado uma aplicação do desenvolvimento de um projeto baseado em SolidWorks® para uma coluna de destilação fracionada, em que se utilizando a ferramenta SimMechanics do MATLAB®, é possível obter o diagrama de blocos do processo, para o posterior projeto de um sistema de controle.

Utilizando um controlador *fuzzy* baseado nas regras de Mandani, foram implementados os controles para três saídas da coluna de destilação, com a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®/Simulink.

O uso da biblioteca SimMechanics simplifica a identificação de um modelo matemático para o processo, já que permite importar o desenho CAD. Os projetos desenvolvidos em SolidWorks® pode ser um trabalho complexo, porém permite trabalhar com cada uma das partes do processo, o que dessa forma, permite incluir detalhes que talvez seja mais complexo fazer mediante métodos tradicionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNL (*Universidad Nacional de Loja*) no Equador, ao ICIMAF em Havana (Cuba) e ao IFPB (João Pessoa, Brasil), pela ajuda que culminou no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- BEQUETTE, B. W. Process dynamics: modeling analysis and simulation. Prentice Hall, 1998.
- BORROTO, M. A. R. Identificación y control predictivo de una columna de destilación etanol-agua. In: CONGRESO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS (CIE 2015), 2015, Villa Clara (Cuba).
- CEKUS, D.; POSIADALA, B.; WARYS, P. Integration of modeling in SolidWorks and Matlab/Simulink environments. **Archive of Mechanical Engineering**, v. 61, n. 01, p. 57-74, 2014.
- CHEINGJONG, P.; PRATISHTHANANDA, S. Fuzzy supervisory PI control of a binary distillation column via distributed control systems. 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2008), Hanoi (Vietnam), pp. 577-581, 2008.
- HUICK, B. *et al.* Identification of a pilot scale distillation column: a kernel based approach. In: 18th IFAC World Congress, 2011, Milano (Italy), p. 471-476.
- IBÁÑEZ, A. M. A. **Modelado y control de una columna de destilación binaria**. 2010. Tesis de maestría (Maestría en Ingeniería – Automatización Industrial)– Universidad Nacional de Colombia, Manizales (Colombia), 2010.
- KISTER, H. Z. Distillation operation. McGraw-Hill, 1990.
- _____. Distillation design. McGraw-Hill, 1992.
- LUYBEN, W. L. Practical distillation control. Springer, 1992
- _____. Process modeling and control for chemical engineers. Mc-Graw Hill, 1998.
- _____. Distillation design and control using Aspen simulation. Wiley, 2013.
- MACÍAS, M. G. **Simulación de columnas de destilación utilizando el modelo RadFrac disponible en Aspen Plus V8.0**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=iug75VhULs4>>. Acesso em: maio de 2015.
- MENDEL, J. M. (1995). Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **Proceedings of the IEEE**, v. 83, n. 03, p. 345-377, 1995.

MORALES-LUNA, G. Introducción a la lógica difusa. 2002, Ciudad del Mexico (Mexico): Cinvestav-IPN. Disponível em: <ftp://cs.cinvestav.mx/GuillermoMorales/LHoy/morales.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.

RICO-RAMIREZ, V.; DIWEKAR, U. Multicomponent distillation. In: **Encyclopedia of Separation Science**. London (United Kingdom): Academic Press, 2000. p. 1071-1081.

ROVAGLIO, M. *et al.* Rigorous dynamics and feedforward control design for distillation process. **American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal**, v. 36, n. 04, p. 576-586, 1990.

SEADER, J. S.; SIROLA, J. J.; BARNICKI, S. D. Distillation. In: PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (Org.). **Perry's chemical engineers handbook**. McGraw-Hill, 1997, p. 13.1-13.108.

SEBORG, D. E. *et al.* Process dynamics and control. Wiley, 2010.

SHAOQIANG, Y.; ZHONG, L.; XINGSHAN, L. Modeling and simulation of robot based on Matlab/SimMechanics. In: 2008 27th Chinese Control Conference, 2008, Kunming (China), p. 161-165.

SKOGESTAD, S. Dynamics and control of distillation columns: a tutorial introduction. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 75, n. 06, pp. 539-562, 1997.

SKOGESTAD, S. The dos and don'ts of distillation column control. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, n. 01, pp. 13-23, 2007.

STENZ, R.; KUHN, U. Automation of a batch distillation column using fuzzy and conventional control. **IEEE Transactions on Control System Technology**, v. 03, n. 02, pp. 171-176, 1995.

VILLETA, M. *et al.* Modelo para la conducción eficiente y sostenible basado en lógica borrosa. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)**, v. 09, n. 03, p. 259-266, 2012.

WORAPRADYA, K.; PRATISHTHANANDA, S. Real-time control of a binary distillation column using HGA fuzzy supervisory PI controllers. **Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications**, Toronto (Canada), pp. 814-818, 2005.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes (Vol. 3). **IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 01, p. 28-44, 1973.